

## **JP2004266339A**

Publication Title:

OPTICAL TRANSMISSION METHOD AND DEVICE

Abstract:

Abstract of JP 2004266339

(A) PROBLEM TO BE SOLVED: To compensate waveform distortion by using characteristic that, even if every linear distortion occurs on a time base, a spectrum shape is perfectly preserved. ; SOLUTION: An optical pulse which has been transmitted via an optical fiber transmission path 2 from an optical pulse transmitter 1 is transmitted. An optical Fourier transforming device 3 compensates the waveform distortion by linear effects in the optical fiber transmission path 2 by making the optical pulse incident, performing optical Fourier transformation with the optical pulse on the time base onto a frequency axis, replacing frequency with time, and reproducing the frequency spectrum of the optical pulse on the time base. A photodetector 4 obtains the pulse waveform before transmission by the optical fiber transmission path 2 by receiving the optical pulse from the optical Fourier transforming device 3 and transforming this to an electrical signal. ; COPYRIGHT: (C)2004,JPO&NCIP

-----

Courtesy of <http://v3.espacenet.com>

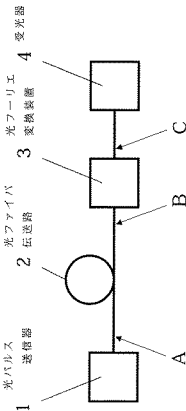
(S1) Int. Cl. <sup>7</sup> H 0 4 B 10/02 H 0 4 B 10/18		F I H O 4 B 9/00 M	テーマコード (参考) 5 K 1 0 2
審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 16 頁)			
(21) 出願番号 (22) 出願日	特願2003-23973 (P2003-23973) 平成15年1月31日 (2003. 1. 31)	(71) 出願人 503360115 独立行政法人 科学技術振興機構 埼玉県川口市本町 4 丁目 1 番 8 号 (74) 代理人 100107010 弁理士 橋爪 健 (72) 発明者 廣岡 俊彦 宮城県仙台市若林区連坊小路 2 - 3 - 5 0 1 (72) 発明者 中沢 正隆 宮城県仙台市青葉区国見ヶ丘 3 - 2 - 1 3 F ターム (参考) 5K102 AA01 AH23 AH26 KA02 KA05 KA20 MA02 RB01	
(54) 【発明の名称】 光伝送方法及び光伝送装置			

(57) 【要約】

【課題】あらゆる線形歪みが時間軸上に発生してもスペクトル形状は完全に保存されているという性質を用いて波形歪みを補償すること。

【解決手段】光パルス送信器1から光ファイバ伝送路2を経て伝送された光パルスが送信される。光フーリエ変換装置3は、光パルスを入射し、時間軸上の光パルスを周波数軸上へ光フーリエ変換し、周波数と時間を入れ替え光パルスの周波数スペクトルを時間軸上に再生することによって、光ファイバ伝送路2における線形効果による波形歪みを補償する。受光器4は、光フーリエ変換装置3からの光パルスを受光し、これを電気信号に変換することにより光ファイバ伝送路2の伝送前のパルス波形を得る。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

送信端において光パルスをデジタル変調し、光ファイバ伝送路中を伝搬させ、それを受光器で電気信号に変換する光伝送方法において、受光器の前に設置された光フーリエ変換装置によって、光ファイバ伝送路を経て伝送された光パルスの時間波形をその周波数スペクトルの形状に変換することにより、光パルスが光ファイバにおいて受けるあらゆる線形時間歪みを該周波数スペクトルの形状が保存されることを利用して除去し、受光端でもとの信号波形を再現する光伝送方法。

## 【請求項2】

請求項1に記載の光伝送方法において、伝送される光パルスとして、パルスの半値全幅と周波数スペクトル幅の積がフーリエ限界条件を満たすパルス又はトランスフォームリミットなパルスを用いることにより、その時間波形のフーリエ変換が該パルスのスペクトル形状に完全に又は実質的に対応することを特徴とする光伝送方法。

## 【請求項3】

請求項1に記載の光伝送方法において、伝送される光パルスとして、時間波形とスペクトル波形が等しい又は略等しい光パルスを用いることを特徴とする光伝送方法。

## 【請求項4】

請求項1に記載の光伝送方法において、光パルスとして光ソリトンを用いることを特徴とする光伝送方法。

## 【請求項5】

請求項1に記載の光伝送方法において、光ファイバにおけるパルス歪みの原因となる任意の分散、偏波モード分散を完全に補償し、無歪み伝送を実現することを特徴とする光伝送方法。

## 【請求項6】

請求項1に記載の光伝送方法において、任意の分散、偏波モード分散が時間的に変動しても常に無歪みの光伝送が実現することを特徴とする光伝送方法。

## 【請求項7】

送信端において光パルスをデジタル変調し、光ファイバ伝送路中を伝搬させ、それを受光器で電気信号に変換する光伝送に用いられる光伝送装置において、受光器と、前記受光器の前に設置された光フーリエ変換装置とを備え、前記光フーリエ変換装置によって、光ファイバ伝送路を経て伝送された光パルスの時間波形をその周波数スペクトルの形状に変換することにより、光パルスが光ファイバにおいて受けるあらゆる線形時間歪みを該周波数スペクトルの形状が保存されることを利用して除去し、受光端でもとの信号波形を再現する光伝送装置。

## 【請求項8】

請求項7に記載の光伝送装置において、前記光フーリエ変換装置は、光ファイバ伝送路の伝送後の光パルス列に対して、駆動周波数が該パルス伝送の伝送速度に設定され、光パルス列に同期して各光パルスに位相変調を印加するための位相変調器と、前記位相変調器から出力された光パルスに対して、群速度分散を与えるための分散要素とを備えた光伝送装置。

## 【請求項9】

請求項7に記載の光伝送装置において、前記光フーリエ変換装置は、位相変調器と分散要素とを備え、前記位相変調器の位相変調のチャープ率 $K$ と分散要素の群速度分散 $D$ とが $K = 1/D$ の関係を満たすことを特徴とするフーリエ光伝送装置。

## 【請求項10】

請求項7に記載の光伝送装置において、前記光フーリエ変換装置は、位相変調器を備え、前記位相変調器は、 $\text{LiNbO}_3$ などの電気光学効果を用いた素子、EA (Electro-Absorption) 又はSOA (Semiconductor Optical Amplifier) などにおける位相変調効果を用いた素子のいずれかを有することを特徴とする光伝送装置。

【請求項11】

請求項7に記載の光伝送装置において、前記光フーリエ変換装置は、分散要素を備え、前記分散要素は、群速度分散特性を有する単一モード光ファイバ等の光ファイバ、回折格子対、ファイバブラッググレーティング、VIP A型可変分散補償器、アレイ導波路回折格子、および回折格子と空間変調器の組み合わせなどを用いることを特徴とする光伝送装置。

【請求項12】

請求項7に記載の光伝送装置において、前記光フーリエ変換装置は、入力された光パルス列の一部を分岐する光カップラと、前記光カップラにより分岐された光パルス列の一方を入射し、光パルス列を遅延するための光遅延素子と、前記光カップラにより分岐された光パルス列の他方を入射し、光パルス列に含まれるクロック信号を抽出するクロック信号抽出回路と、得られたクロック信号の位相シフト量を調整して出力するための位相シフトと、前記遅延素子からの光パルス列を入力し、前記位相シフトからの出力により駆動されて光パルス列を位相変調する位相変調器と、前記位相変調器からの光パルス列を入力し、光パルスに二次分散を与えて前記受光器に出力する分散要素と、をさらに備えた光伝送装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光伝送方法及び光伝送装置に係り、特に、任意の分散ならびに偏波モード分散、タイミングジッタを有する光ファイバに伝送される信号の波形歪みをフーリエ変換により同時にかつ完全に補償する新たな光伝送方法及び光伝送装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

光ファイバ中の波長分散や偏波分散等の線形効果は、パルスの広がりやリップルの発生及び中心時間位置のシフトといった時間波形の歪みをもたらすことがよく知られている。特に1チャンネルあたり40 Gbit/s以上の超高速時分割多重伝送においては、三次以上の高次分散や偏波モード分散による波形歪みが大きな影響を及ぼす。

【0003】

従来より、このような光ファイバ伝送路の線形歪み効果を補償するために、分散補償ファイバやグレーティングによる二次分散の補償、逆分散スロープファイバによる二次・三次分散の同時補償、位相共役素子を用いた分散補償などが提案され、等価的に分散フラットファイバ伝送路を実現してきた。

【0004】

従来技術として、三次及び四次分散の補償技術としては今までに、伝送前に適切な二次分散量をもつファイバにより信号に線形チャープを与えた後に伝送ファイバの三次又は四次分散の大きさに応じた正弦又は余弦位相変調を印加することによって、各次数の分散をそれぞれ補償する技術がPelusi等によって報告されている（非特許文献1及び2参照）。さらに、従来技術として、余弦位相変調の振幅とタイミングを適切に選ぶことにより、伝送路の三次、四次分散を同時に補償できることが報告されており、これにより1.28 Tbit/s-70 km 光時分割伝送に成功している（非特許文献3及び4参照）。

。また、従来、偏波モード分散による群遅延を補償するために光フーリエ変換が提案された(非特許文献5)。

【0005】

【非特許文献1】

M. D. Pelusi, Y. Matsui, and A. Suzuki, "Phase modulation of stretched optical pulses for suppression of third-order dispersion effects in fiber transmission," Electron. Lett. Vol. 34, pp. 1675-1677 (1998)

【非特許文献2】

M. D. Pelusi, Y. Matsui, and A. Suzuki, "Fourth-order dispersion suppression of ultrashort optical pulses by second-order dispersion and cosine phase modulation," Opt. Lett. Vol. 25, pp. 296-298 (2000)

【非特許文献3】

T. Yamamoto and M. Nakazawa, "Third- and fourth-order active dispersion compensation with a phase modulator in a terabit-per-second optical time-division multiplexed transmission," Opt. Lett. Vol. 26, pp. 647-649 (2001)

【非特許文献4】

M. Nakazawa, T. Yamamoto, and K. R. Tamura, "1.28 Tbit/s - 70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator," ECOC 2000, PD. 2.6

【非特許文献5】

M. Romagnoli, P. Franco, R. Corsini, A. Schffini, and M. Midrio, "Time-domain Fourier optics for polarization-mode dispersion compensation," Opt. Lett. Vol. 24, pp. 1197-1199 (1999).

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、ファイバによる分散補償は簡便であるものの、三次分散まで含めた波長分散の一括補償は、二次分散と三次分散の比率のマッチングが必要なため、一般的には難しい技術とされている。また、位相共役を用いる場合には、偶数次の分散しか補償できないという大きな課題を有する。さらに、位相変調を用いた伝送前分散補償方式では、位相変調の調整に際しあらかじめ伝送路全体の分散値を正確に知っておく必要がある。

【0007】

さらに、これらの方式では分散補償量が固定されているため、分散値の時間的な変動に応じて分散補償量をダイナミックに変化させることができない。このため、従来から、適応等化という技術が必要とされている。さらに、これらの方式においてはいずれも、偏波モード分散の補償が不可能である。

【0008】

そこで、本発明は、以上の点に鑑み、これらの課題点を一挙に解決するために、従来のよ

うに時間軸上で波形歪みを完全補償しようとする技術の代わりに、あらゆる線形歪みが時間軸上に発生してもスペクトル形状は完全に保存されているという性質を用いて波形歪みを補償することを目的とする。すなわち、本発明は、フーリエ変換により伝送後の光信号のスペクトル形状を時間軸上の1ビットに変換することで線形歪みのまったくない又はほとんどない元の信号波形を再現し、実質的に分散フリーな光ファイバ伝送を実現することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】

本発明の解決手段によると、送信端において光パルスをデジタル変調し、光ファイバ伝送路中を伝搬させ、それを受光器で電気信号に変換する光伝送方法において、受光器の前に設置された光フーリエ変換装置によって、光ファイバ伝送路を経て伝送された光パルスの時間波形をその周波数スペクトルの形状に変換することにより、光パルスが光ファイバにおいて受けるあらゆる線形時間歪みを該周波数スペクトルの形状が保存されることを利用して除去し、変換された周波数スペクトルの周波数と時間を変換することにより、光ファイバ伝送路による光パルスの時間波形歪みを補償する光伝送方法、および前記光フーリエ変換装置と受光器とを備えた光伝送装置が提供される。

【0010】

【作用】

本発明を用いることにより、今までは補償が困難であった任意の分散や偏波モード分散による時間波形の線形歪みを、同時にかつ完全に又はほぼ完全に補償することができるため、光ファイバ通信の通信容量の拡大ならびに伝送距離の延長が実現できる。

【0011】

また、本発明を用いることにより、光ファイバの分散や偏波モード分散の精密な補償を必要としない、実用的・経済的な光ファイバ通信が実現できる。

【0012】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面を用いて詳細に説明する。

1. システム構成・動作

図1は、本発明にかかるフーリエ光伝送システムの一実施の形態を示す図である。このフーリエ光伝送システムは、光パルス送信器1、光ファイバ伝送路2、光フーリエ変換装置3、受光器4を備える。光受信器としての光伝送装置は、光フーリエ変換装置3及び受光器4を備える。

【0013】

光パルス送信器1は、光源から発生した光パルスを電気信号でデジタル変調することによって、通信対象である情報を担う電気信号を光信号に変換し、該情報を担う光パルス列を光ファイバ伝送路2中へ射出する。ここで、信号パルスのパルス幅とそのスペクトル幅の積はフーリエ限界の条件（スペクトル幅を $\Delta\nu$ 、時間パルス幅を $\Delta\tau$ とすると、例えばガウス型パルスの場合には $\Delta\nu\Delta\tau \approx 0.441$ 、sech型パルスの場合には $\Delta\nu\Delta\tau \approx 0.315$ ）を満たしていることが望ましい。このような、時間波形に対して一切過不足のないスペクトル幅を有する光パルスは、フーリエ限界的なパルス（以後トランスフォームリミットなパルスと呼ぶ）と呼ばれ、この光パルスを利用すると一番性能の良い理想的なフーリエ光伝送が実現できる。

【0014】

光ファイバ伝送路2は、任意の分散及び偏波モード分散を有する各種の光ファイバで構成される伝送線路である。これらの分散量は時間的な変動を伴ってもよい。

【0015】

光フーリエ変換装置3は、光ファイバ伝送路2を経て伝送された光パルスを入射し、時間軸上のパルス信号系列を周波数軸上のスペクトルへ光フーリエ変換するものである。なお

、光フーリエ変換装置3は、高速な時分割多重信号の場合には、低速な信号に多重分離した後、フーリエ変換を施してもよい。

【0016】

受光器4は、光フーリエ変換装置3によって光ファイバ伝送路2における分散及び偏波モード分散が補償された光パルスを受光し、これを電気信号に変換するものである。受光器4は、例えば、PIN及びAPD等の適宜の光検出器が用いられる。

【0017】

次に、このフーリエ光伝送システムの動作の概要について説明する。光ファイバ伝送路2で伝搬される光信号は、一般に、光時分割多重の信号が入力される。本実施の形態の動作に関しては、光フーリエ変換装置3には時分割多重信号を構成する光パルス列が入力され、光パルス列を構成する各パルスに注目して説明する。

【0018】

図2に、光パルスの時間波形についての説明図を示す。図2(a)～(c)は、それぞれ図1中の光ファイバ伝送路のA～Cの各部分における光パルスの時間波形の概略を示す。

【0019】

また、図3に、光パルスの周波数スペクトル形状の説明図を示す。図3(a)～(c)は、それぞれ図1中の光ファイバ伝送路のA～Cの各部分における光パルスの周波数スペクトルの概略を示す。

【0020】

まず、電気信号を光パルス送信器1によって光パルスに変換し、該光パルスを光ファイバ伝送路2に入射し、該光ファイバ伝送路2中を伝搬させる。このとき光ファイバ伝送路2への入射時に、光パルスの時間波形 $u_{in}(t)$ (図2(a))がフーリエ限界パルス(トランスフォームリミットなパルス)であるよう、光パルス送信器1においてあらかじめ周波数スペクトル $U_{in}(\omega)$ を整形しておくことが好適である(図3(a))。

【0021】

光ファイバ伝送路2中を伝搬する光パルスは、通常光ファイバ伝送路2の有する分散ならびに偏波モード分散によって複雑な線形歪みを受ける。通常の光通信ではこの歪みが伝送性能を決定する。しかしながら本実施の形態では、光ファイバ伝送路2の有する分散ならびに偏波モード分散は光ファイバ伝送路2へ入射時のスペクトルの包絡線形状を一切変形させないため、完全な原波形が周波数軸上に再生できることが、主な特徴のひとつである。光ファイバ中の分散の効果はスペクトルの各周波数成分の位相シフトに変換されるが、光検出器では包絡線のみを検出するのでこの位相シフトは一切問題とならない。すなわち、光ファイバ伝送路2での線形歪みを受けた時間信号を $u(t)$ (図2(b))とすると、光フーリエ変換装置によりその周波数スペクトル $U(\omega)$ (図3(b))を時間軸上に再生させることがポイントである。

【0022】

言い換えると、伝送された光パルスの時間波形が光フーリエ変換装置3を通過し、時間と周波数を入れ替え該光パルスの周波数スペクトルを時間軸上に再生することによって、図1中Aにおける光ファイバ伝送路2への入射光パルスの周波数スペクトル(図3(a))を出力端において完全に再現することが可能になる(図2(c))。光フーリエ変換装置3を通過した光パルスは、受光器4により再び電気信号に変換され、信号として取り出される。われわれはこの光伝送方式を、「フーリエ光伝送」と名づける。

【0023】

図4に、光フーリエ変換装置3の構成図を示す。光フーリエ変換装置3は、光カップラ5、クロック信号抽出回路6、位相シフタ7、電気増幅器8、遅延ファイバ9、位相変調器10、二次分散要素11を備える。

【0024】

位相変調器10としては、例えば、 $\text{LiNbO}_3$ などの電気光学効果を用いた位相変調器が好適に用いられる。位相変調器10は、あるいはEA(Electro-Absorption)やSOA(Semiconductor Optical Amplifier)などの電気光学効果を用いた位相変調器が好適に用いられる。

r) などにおける位相変調効果を用いてもよい。位相変調器10には一般に偏波依存性のあるものが多いが、無偏波形の光デバイスあるいは偏波ダイバーシティーによる方法を採用して無偏波化を図ることが望ましい。位相変調器10の駆動周波数は該パルス伝送の伝送速度である。

【0025】

位相変調器10は、光ファイバ伝送路2の伝送後のパルスに同期して位相変調を印加するために、伝送信号の一部を光カップラ5により分岐し、一方を遅延ファイバ9に、他方をクロック信号抽出回路6に導く。クロック信号抽出回路6は、伝送信号に含まれるクロック信号（正弦波信号）を抽出し、得られたクロック周波数で位相シフタ7及び電気増幅器8を経て、位相変調器10を駆動する。位相シフタ7及び光遅延ファイバ9は、その際位相変調が光パルスに最適に同期して印加されるように機能する。もし変調のタイミングが温度などによりずれる場合には、位相シフタ7が自動的に位相シフト量を調整し、最適な変調を印加する技術を用いることができる。電気増幅器8は、位相シフタ7の出力により位相変調器10を駆動するための駆動信号を出力する。

【0026】

また、二次分散要素11としては、例えば、 $1.3 \mu\text{m}$ の波長帯域付近に零分散領域が存在する群速度分散特性を有するような単一モード光ファイバあるいは回折格子対、ファイバブラッググレーティング、VIPA型可変分散補償器、アレイ導波路回折格子、および回折格子と空間変調器の組み合わせ等を用いることができる。

【0027】

光フーリエ変換装置単体は、非特許文献5に記載された光フーリエ変換に関するRomagnoliらの論文のように、もともと偏波モード分散による群遅延を補償するために提案されたものである。しかし、Romagnoliらの論文等の従来技術では、光フーリエ変換装置を偏波モード分散のみを補償することに利用しているだけである。したがって、本実施の形態の光フーリエ変換装置3のように、新たな一般的概念として時間と周波数を入れ替えることにより無歪み伝送をするアイデアには、従来は至っていない。本発明は、特に、時間軸上での歪みをスペクトル上に変換することにより全ての線形歪みを除去するフーリエ光伝送という新たな原理及び技術を提案するものである。

【0028】

2. 波形歪みの補償についての詳細

次に、本フーリエ光伝送方式を用いて、任意の分散ならびに偏波モード分散を有する光ファイバ伝送路の線形効果による光パルスの波形歪みが本実施の形態の構成でどのように補償されるかを詳しく説明する。

【0029】

光ファイバ中のパルス伝搬は、その搬送波周波数に比べてパルスの包絡線がゆっくり変化する場合には、包絡線近似によって記述される。ここではそのパルスのゆっくり変化する電界包絡線振幅を  $u(z, t)$ 、媒質中での伝搬定数を  $\beta(\omega)$ 、搬送波の周波数を  $\omega_0$  とする。ここで、 $t$  は時間、 $z$  は光ファイバの長さ方向の位置（座標）、 $\omega$  は周波数である。このとき光ファイバ中を伝搬する電界  $e(z, t)$  は

【0030】

【数1】

$$e(z, t) = u(z, t) \exp[i\{\beta(\omega)z - \omega_0 t\}] \quad (1)$$

【0031】

と表される。ここで

【0032】

【数2】



$$\begin{aligned}\beta &= \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\beta_2}{2!}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3!}(\omega - \omega_0)^3 + \dots \\ &= \beta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n}{n!}(\omega - \omega_0)^n\end{aligned}\quad (2)$$

【0033】

で与えられる。ただし

【0034】

【数3】

$$\beta_0 = \beta(\omega_0), \beta_1 = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega_0}, \beta_2 = \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0}, \beta_3 = \left. \frac{\partial^3 \beta}{\partial \omega^3} \right|_{\omega_0}, \dots, \beta_n = \left. \frac{\partial^n \beta}{\partial \omega^n} \right|_{\omega_0}$$

【0035】

である。

光ファイバのような分散性媒質において光電界  $e(z, t)$  はマクスウェル方程式

【0036】

【数4】

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} - \frac{\beta^2}{\omega_0^2} \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

【0037】

を満たすので、光電界  $e(z, t)$  の周波数スペクトル  $E(z, \omega)$  は次の方程式を満たす（なお、周波数スペクトルを、単にスペクトルという場合がある。）。

【0038】

【数5】

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \beta^2(\omega)E = 0 \quad (4)$$

【0039】

ここで  $E(z, \omega)$  は

【0040】

【数6】

$$E(z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e(z, t) \exp(i\omega t) dt \quad (5)$$

【0041】

で与えられる。なお式（4）では、搬送波周波数に比べてパルスのスペクトル広がりがありあまり大きくないことから、 $\omega^2$  を  $\omega_0^2$  と近似している。

【0042】

ここで包絡線  $u(z, t)$  に関する方程式が重要であり、 $u(z, t)$  のフーリエ変換  $U(z, \omega - \omega_0)$  について考える。すなわち  $E(z, \omega)$  は式（1）と（5）より

【0043】

【数7】

$$E(z, \omega) = U(z, \omega - \omega_0) \exp(i\beta(\omega_0)z) \quad (6)$$

【0044】

と書き直すことができる。ただし  $U(z, \omega - \omega_0)$  は

【0045】

【数8】

$$U(z, \omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} u(z, t) \exp[i(\omega - \omega_0)t] dt \quad (7)$$

【0046】

で与えられる。

式(6)を式(4)に代入し、 $U(z, \omega - \omega_0)$  が  $z$  に関して緩やかに変化していることから  $z$  についての2回微分を無視し、 $\beta^2 - \beta_0^2 \approx 2\beta_0(\beta - \beta_0)$  を用いると、 $U(z, \omega - \omega_0)$  が満たす伝搬方程式として次式

【0047】

【数9】

$$\frac{\partial U}{\partial z} = i[\beta(\omega) - \beta_0]U \quad (8)$$

【0048】

が得られる。ここで時間領域での基本方程式について考えると、式(2)より

【0049】

【数10】

$$i \frac{\partial U}{\partial z} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n}{n!} (\omega - \omega_0)^n U = 0 \quad (9)$$

【0050】

と表すことができる。

さらに式(9)を逆フーリエ変換することにより、 $u(z, t)$  の満たす線形波動方程式として

【0051】

【数11】

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n \beta_n}{n!} \frac{\partial^n u}{\partial t^n} = 0 \quad (10)$$

【0052】

が最終的に得られる。ただし、ここで

【0053】

【数12】

$$u(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(z, \omega - \omega_0) \exp[-i(\omega - \omega_0)t] d(\omega - \omega_0) \quad (11)$$

【0054】

である(以下では  $\omega - \omega_0$  をあらためて  $\omega$  と定義する)。すなわち伝送路の線形効果によるパルスの時間波形歪みは式(10)で完全に表現されることになる。

【0055】

その一方で、一般に、あらゆる線形効果のもとでは光信号は周波数領域において位相変化を受けるだけであり、スペクトル形状は完全に保存されていることに注目したい(以下の式(12)参照)。ここで、光パルス送信器1から長さ  $z$  までの光ファイバ伝送路2中へ

入射される光パルスの時間信号波形を $u_{in}(t) (= u(0, t))$ 、その周波数スペクトルを $U_{in}(\omega) (= U(0, \omega))$ とし、光ファイバ伝送路2中での線形歪みを受けた時間信号波形を $u(t) (= u(z, t))$ 、その周波数スペクトルを $U(\omega) (= U(z, \omega))$ とする。式(8)を積分して、長さ $z$ のファイバを伝搬した後のスペクトルは、

【0056】

【数13】

$$U(z, \omega) = U_{in}(\omega) \exp[i\beta(\omega)z] \quad (12)$$

【0057】

与えられる。すなわち、スペクトル形状は位相変化 $\exp[i\beta(\omega)z]$ を除いて完全に保存されることがわかる。

【0058】

さて、ここで長さ $z$ の光ファイバ伝送路2の受信端Bにおける時間波形 $u(z, t)$ から、光フーリエ変換装置3を用いて周波数スペクトル $U(z, \omega)$ を得る方法を以下に述べる。ただし以下では $u(z, t)$ を $u(t)$ 、 $U(z, \omega)$ を $U(\omega)$ とする。

【0059】

まず、伝搬後のパルス信号 $u(t)$ が位相変調器10により放物型の位相変調 $\exp(iKt^2/2)$ を受けた後の時間信号は、 $u(t)$ にその位相変化量をかけて

【0060】

【数14】

$$u'(t) = u(t) \exp(iKt^2/2) \quad (13)$$

【0061】

与えられる。位相変調器10の入出力波形は、入力が $u(t)$ 、出力が式(13)の $u'(t)$ となる。位相変調器10の処理は、式(13)の右辺で入力波形 $u(t)$ に位相 $\exp(iKt^2/2)$ を掛けしている部分に相当する。位相変調器10に予め与えておくパラメータはチャープ率 $K$ である。これは位相変調器の印加電圧の大きさによって制御できる。また、位相変調のタイミングや駆動周波数については、クロック信号抽出回路6や位相シフタ7、光遅延ファイバ9を用いて、伝送信号よりそれらの情報を抽出・調整する。

【0062】

ここで $v(t)$ を二次分散要素11による分散 $k''L$ 中を伝搬した後の信号とすると、 $v(t)$ は、 $u'(t)$ がさらに $D=k''L$ で表される二次分散(要素)を伝搬後の時間波形として、以下のように与えられる。

【0063】

【数15】

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} u(t') \exp(iKt'^2/2) \exp(i\omega t') dt' \right] \exp(iD\omega^2/2) \exp(-i\omega t) d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \iint u(t') \exp[iD\omega^2/2 + i\omega(t'-t) + iKt'^2/2] dt' d\omega \end{aligned} \quad (14)$$

【0064】

すなわち、二次分散要素11の入出力波形は、入力が式(13)の $u'(t)$ 、出力が式(14)の $v(t)$ となり、 $v(t)$ は、 $u'(t)$ をフーリエ変換したものに周波数軸

上で二次分散関数  $\exp(i D \omega^2 / 2)$  をかけ、さらにその全体を逆変換することにより得られる。ここで二次分散関数は式 ( 1 2 ) において  $\beta(\omega)$  を  $\beta(\omega) = D \omega^2 / 2$  とおいて得られる。

【 0 0 6 5 】

次に、ここで該位相変調器の位相変調パラメータ  $K$  を  $K = 1 / D$  を満たすように選ぶ。さらに変数  $T = t - t$  を導入すると、式 ( 1 4 ) は次のように変形される。

【 0 0 6 6 】

【数 1 6】

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t+T) \exp[i(t+T)^2/2D] dT \int_{-\infty}^{\infty} \exp[iD\omega^2/2 + i\omega T] d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t+T) \exp[i(t+T)/2D] dT \int_{-\infty}^{\infty} \exp[iD(\omega+T/D)^2/2 - iT^2/2D] d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t+T) \exp[i(t^2+2Tt)/2D] \sqrt{2\pi/iD} dT \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \exp(it^2/2D) \int_{-\infty}^{\infty} u(t+T) \exp(iTt/D) dT \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \exp(-iKt^2/2) U(t/D) \end{aligned}$$

( 1 5 )

【 0 0 6 7 】

すなわち、式 ( 1 5 ) の結果から、光フーリエ変換装置 3 の出力時間波形  $v(t)$  ( 図 2 ( c ) ) は、実際、光フーリエ変換装置 3 の入力波形のスペクトル  $U(\omega)$  ( 図 3 ( b ) ) に比例していることがわかる。このとき

【 0 0 6 8 】

【数 1 7】

$$\omega = t / D$$

( 1 6 )

【 0 0 6 9 】

である。言い換えると、光フーリエ変換装置 3 の出力時間波形  $v(t)$  は、時間軸を  $t/D = \omega$  とスケールを変換したときの、光フーリエ変換装置 3 の入力波形のスペクトル形状  $U(\omega)$  に対応している。

【 0 0 7 0 】

一方、式 ( 1 2 ) で示したように、線形伝送がスペクトルを保存するという性質から、受信端 B でのスペクトル  $U(\omega)$  の包絡線形状 ( 図 3 ( b ) ) は、送信端 A での信号のスペクトル  $U(0, \omega)$  (  $= U_{in}(\omega)$  ) の包絡線形状 ( 図 3 ( a ) ) に等しい。すなわち式 ( 1 2 ) 及び ( 1 5 ) より、 $v(t)$  は最終的には光ファイバ伝送路 2 への入力信号スペクトル  $U_{in}$  を用いて式 ( 1 7 ) のように表される。

【 0 0 7 1 】

【数 1 8】

$$v(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} U_{in}(t/D) \exp(-iKt^2/2 + i\beta(t/D)\xi) \quad ( 1 7 )$$

【 0 0 7 2 】

すなわち、 $v(t)$  により、入力スペクトル  $U_{in}(\omega)$  の形状を出力に再生できることになる。位相変調器 1 0 と二次分散要素 1 1 の組み合わせで光パルスのフーリエ変換像が

生成できるということ自体は既に知られているが、本発明では光フーリエ変換のための装置を用いて波形無歪み伝送を実現することができるという点がポイントである。

【0073】

さて、ここで、信号波形がトランスフォームリミットであれば周波数スペクトルから時間波形を直ちに求めることができることがわかる。例として、光ファイバ伝送路2への入力信号の時間波形がガウス型  $u_{in}(t) = A \exp(-t^2/2T_0^2)$  のトランスフォームリミットな波形である場合を考える。ガウス型パルスは  $\text{sech}$  型とならず、フーリエ変換によって波形の関数形が変わらないパルスである。すなわちそのスペクトルは

【0074】

【数19】

$$\begin{aligned} U_{in}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} u_{in}(t) \exp(i\omega t) dt \\ &= \sqrt{2\pi T_0^2} A \exp(-T_0^2 \omega^2 / 2) \end{aligned} \quad (18)$$

【0075】

である。このとき光フーリエ変換装置3の出力波形は、式(17)の結果から、 $\omega$  を  $t/D$  で置き換えて、次式で与えられる。

【0076】

【数20】

$$v(t) = \sqrt{T_0^2 / iD} A \exp(-T_0^2 t^2 / 2D^2) \exp(-iKt^2/2 + i\beta(t/D)\xi) \quad (19)$$

【0077】

ここで、二次分散の絶対値  $|D| = T_0^2$  に選ぶと

【0078】

【数21】

$$v(t) = \sqrt{1/i \text{sgn}(k'')} A \exp(-t^2/2T_0^2) \exp(-iKt^2/2 + i\beta(t/T_0)\xi) \quad (20)$$

【0079】

となる。受光器4が備える通常の光検出器では光電界の強度  $I(t) = |v(t)|^2$  を検出するので、式(20)の  $v(t)$  から次式のように、送信端Aでの時間波形  $u_{in}(t) = A \exp(-t^2/2T_0^2)$  (図2(a)) を直接再現することが可能となる。

【0080】

【数22】

$$|v(t)|^2 = A^2 \exp(-t^2/T_0^2)$$

【0081】

このように、波形がガウス型の場合、 $|D| = T_0^2$  と選ぶと、式(17)においてスペクトル  $U_{in}(t/D)$  がそのまま時間波形  $u_{in}(t)$  に対応することから、結局、光ファイバ伝送路の線形効果を受ける前の時間波形を出力Cにおいて時間軸上に直接忠実に又は完全に再現することができる点がポイントである。

【0082】

一般に、波形がガウス型でない場合は、受光器4の出力でその光電界の強度  $I(t) = |v(t)|^2$  が次式のように得られる。

【0083】

【数23】

$$|v(t)|^2 = \frac{1}{2\pi D} |U_m(t/D)|^2$$

【0084】

この方式では伝送歪みが線形であれば、その具体的な種類や大きさとは一切関係なく補償されることが重要である。そのため、分散値の大きさやダイナミックな時間変動、さらには分散の次数に依存しないということが最大の特徴のひとつである。またソリトンのような非線形パルス伝送においてもスペクトル形状が伝搬において維持されるのであれば、全く同様に適用できる。すなわちソリトンも時間幅 $\Delta\tau$ とスペクトル幅 $\Delta\nu$ の間にはトランスフォームリミットな関係があるので、本方式が利用できる。分散マネージ (DM) ソリトンに関しても、チャープがゼロになる最短パルスの位置もしくは適当なファイバを挿入し強制的にチャープをゼロにすることにより、本方式が利用できる。

【0085】

3. 波形歪み補償の例

図5は、光パルスの波形歪みとその補償の効果を示す図である。この図は、本実施の形態のフーリエ変換方式における分散補償の効果を確認するために、非特許文献4の実験パラメータを用いて数値計算を行なった結果を示すものである。この図では、丸、破線、実線が、それぞれ図1中A、B、Cの各点（すなわち光ファイバ伝送路2伝送前、伝送後、光フーリエ変換装置3の出力）における光信号の時間波形を示している。

【0086】

ここでは、一例として、図1中Aにおける時間波形は半値全幅380 fsのガウス型と仮定した。また、光ファイバ伝送路を構成する長さ $L=69.4$  kmのファイバの累積分散はそれぞれ $\beta_2 L \approx -0.0037 \text{ ps}^2$ 、 $\beta_3 L \approx -0.0038 \text{ ps}^3$ 、 $\beta_4 L \approx 0.0058 \text{ ps}^4$ と仮定した。このとき $T_0 = 228 \text{ fs}$ である。この伝送路の分散補償に必要な光フーリエ変換装置の分散量ならびに位相変調パラメータは、 $|D| (=1/|K|) = T_0^2 = 0.052 \text{ ps}^2$ と算出される。光フーリエ変換装置の二次分散要素として $1.3 \mu\text{m}$ 零分散単一モードファイバ ( $k'' = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ) を用いることにすると、必要な長さは $L=2.6$  mである。一台の位相変調器と短いファイバにより簡単に波形再生ができることも本方式の特徴のひとつである。またこのとき位相変調器のチャープ率は $K=1/D=-19.2 \text{ ps}^{-2}$ である。

【0087】

この伝送路においては $\beta_4$ の値が大きいことから四次分散が支配的であり、光フーリエ変換装置による分散補償前には四次分散によりパルスが時間軸に対称に広がり波形が大きく歪んでいる。しかし本方式によるフーリエ変換を行なうことによって、伝送路への入力時間波形が忠実に再現されていることがわかる。

【0088】

図6は、光パルスの波形歪みとその補償に関する数値計算結果の他の一例を示す図である。この図は本実施の形態の効果を確認するために行なった数値計算結果の他の一例を示すものである。この図も同様に、丸、破線、実線が、それぞれ図1中A、B、Cの各点における光信号の時間波形を示している。ここでは図1中Aにおける時間波形は半値全幅380 fsのガウス型とし、伝送路を構成する長さ69.4 kmのファイバの累積分散はそれぞれ $\beta_2 L \approx -0.0037 \text{ ps}^2$ 、 $\beta_3 L \approx 0.1 \text{ ps}^3$ 、 $\beta_4 L \approx -0.0058 \text{ ps}^4$ と仮定した。すなわち、図5の分散特性に対して、この伝送路では四次分散の符号を反転させ、三次分散を大幅に増やした。このため三次分散の影響が顕著に現れ、光フーリエ変換装置による分散補償前にはパルスが時間軸に非対称に歪んでいる様子がよくわかる。しかし本方式による光フーリエ変換装置を用いた分散補償を行なうことによって、光ファイバ伝送路への入力時間波形が正確に復元できることがわかる。

【0089】

【発明の効果】

以上詳細に説明したように、本発明によれば、位相変調器と二次分散要素を用いて構成さ

れた光フーリエ変換装置を用いて、光ファイバ伝送路において線形歪みを受けた光パルス列の時間波形をその不変量である周波数スペクトルに変換し、伝送路入力における信号のスペクトルを再現し情報を直接取り出すことができる。したがって、本発明のフーリエ光伝送方式を用いることで、光ファイバ伝送路の伝搬特性に依存せず情報を正確に伝送させることが可能となる。

【 0 0 9 0 】

また、本発明によれば、任意の分散ならびに偏波モード分散を有する光ファイバ伝送路の線形効果による光パルスの時間波形の波形歪みを同時にかつ完全に補償することができ、光ファイバ通信の通信容量の拡大ならびに伝送距離の延長が可能となる。また、光ファイバ伝送路の分散や偏波モード分散の精密な制御を一切必要としないので、実用的・経済的な光ファイバ通信を実現することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明にかかるフーリエ光伝送システムの一実施の形態を示す図である。

【図2】光パルスの時間波形についての説明図である。

【図3】光パルスの周波数スペクトル形状の説明図である。

【図4】光フーリエ変換装置3の構成図である。

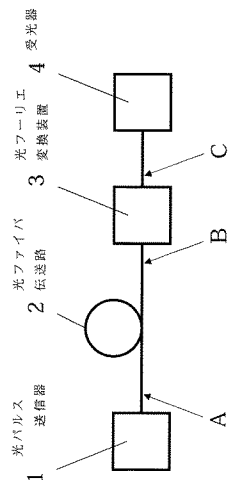
【図5】光パルスの波形歪みとその補償の効果を示す図である。

【図6】光パルスの波形歪みとその補償に関する数値計算結果の他の一例を示す図である。

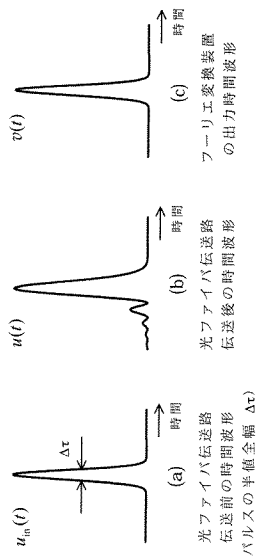
。【符号の説明】

- 1 光パルス送信器
- 2 光ファイバ伝送路
- 3 光フーリエ変換装置
- 4 受光器
- 5 光カップラ
- 6 クロック信号抽出回路
- 7 位相シフト
- 8 電気増幅器
- 9 遅延ファイバ
- 10 位相変調器
- 11 二次分散要素

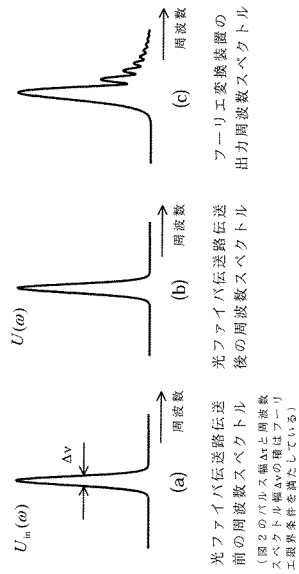
【図1】



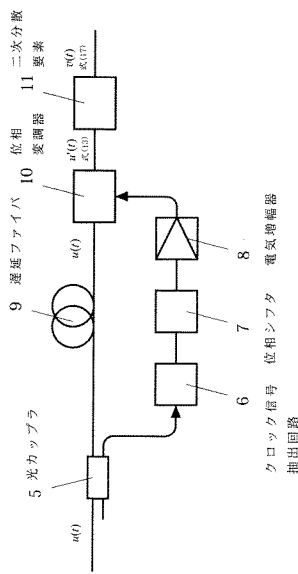
【図2】



【図3】

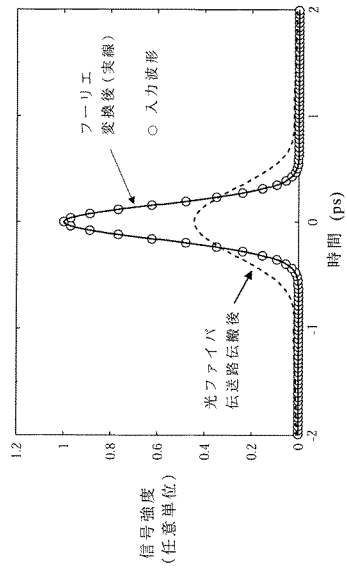


【図4】





【図5】



【図6】

